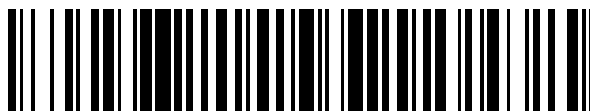


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 829 976**

51 Int. Cl.:

H02H 9/02 (2006.01)

H01F 29/14 (2006.01)

H01F 27/36 (2006.01)

H01F 6/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **03.02.2012** **PCT/AU2012/000090**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.08.2012** **WO12103587**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.02.2012** **E 12742287 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **12.08.2020** **EP 2671298**

54 Título: **Limitador de corriente de falla con núcleos adyacentes y de apantallamiento**

30 Prioridad:

03.02.2011 US 201113020323

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

02.06.2021

73 Titular/es:

ASG SUPERCONDUCTORS S.P.A. (100.0%)
Corso F. M. Perrone 73r
16152 Genova, IT

72 Inventor/es:

DARMANN, FRANCIS ANTHONY;
MORICONI, FRANCO y
HODGE, EOIN PATRICK

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 829 976 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Limitador de corriente de falla con núcleos adyacentes y de apantallamiento

Campo de la invención

5 La invención se refiere en general a un limitador de corriente de falla y a un método de supresión de un diferencial de tensión durante una condición de corriente cero, incluyendo el método la etapa de utilizar el limitador de corriente de falla.

En particular, la invención ha sido desarrollada para limitadores de corriente de falla del tipo de núcleo saturado de alta permeabilidad magnética y van a ser descritos con referencia a esa aplicación. También se divulgan ejemplos de métodos perfeccionados de construcción de un limitador de corriente de falla.

10 Antecedentes de la invención

Los limitadores de corriente de falla de núcleo saturado son ya conocidos. Por ejemplo, las patentes US 7.193.825 y 4.045.823 divulgan limitadores de corriente de falla donde un núcleo se satura magnéticamente durante el funcionamiento normal mediante un campo magnético de estado estable derivado de la corriente de CC que fluye a través de una bobina de CC. El núcleo está fuera de la saturación magnética durante una condición de falla. El limitador de corriente de falla de núcleo saturado está basado en las propiedades no lineales de la saturación/desaturación de alta permeabilidad a efectos de suprimir la corriente que fluye durante la condición de falla.

Desafortunadamente, un número de características operativas indeseadas de tales limitadores de corriente de falla están normalmente presentes durante una condición de falla. Éstas pueden incluir fuerzas electromagnéticas excesivas y/o flujos que pueden ocurrir durante condiciones de falla que proporcionan esfuerzos mecánicos y electromagnéticos excesivos sobre el limitador de corriente de falla. Adicionalmente, los flujos magnéticos generados pueden estar acoplados a cualquier bobina de CC que esté diseñada para saturar normalmente el núcleo. El acoplamiento puede afectar a la saturación en curso y limitar la efectividad del limitador de corriente de falla.

25 Estos y otros efectos indeseados pueden ocurrir con los limitadores de corriente de falla de la técnica anterior.

El documento WO 2009/121143 A1 divulga un limitador de corriente de falla que incluye una serie de postes de alta permeabilidad para definir colectivamente un núcleo para el FCL. Una bobina de CC, a los efectos de saturación de una parte de los postes de alta permeabilidad, circunda la estructura completa por fuera de un recinto en forma de vaso. El vaso contiene un medio de aislamiento dieléctrico. Bobinas de CA, para el transporte de corriente de CA, están bobinadas sobre formadores aislantes e interconectadas eléctricamente entre sí de una manera tal que los sentidos del campo magnético producido por cada bobina de CA en el correspondiente núcleo de alta permeabilidad, son opuestos. Existen barreras de aislamiento entre fases para mejorar las propiedades de resistencia dieléctrica del medio dieléctrico.

Sumario de la invención

35 Un objeto de la presente invención consiste en superar o mejorar al menos una de las desventajas de la técnica anterior, o proporcionar una alternativa útil.

Un objeto de las realizaciones preferidas de la presente invención consiste en proporcionar una forma mejorada de limitador de corriente de falla del tipo de núcleo magnéticamente saturado.

40 Conforme a un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un limitador de corriente de falla, es decir un FCL, conforme a la Figura 1.

El limitador de corriente de falla incluye una primera y una segunda columnas de alta permeabilidad; una primera bobina de fase arrollada alrededor de la primera columna de alta permeabilidad; una segunda bobina de fase arrollada alrededor de la segunda columna de alta permeabilidad; una unidad de saturación de alta permeabilidad que circunda la primera y la segunda columnas de alta permeabilidad para saturar magnéticamente de forma sustancial las columnas durante una operación de no falla, y en donde el apantallamiento o blindaje electromagnético puede estar formado alrededor de la primera y la segunda bobinas de fase.

Conforme a un aspecto adicional de la presente invención, se proporciona un limitador de corriente de falla en donde las bobinas de fase están dispuestas de forma sustancialmente adyacente y paralelas entre sí.

50 La primera y la segunda bobinas de fase están preferiblemente arrolladas alrededor de columnas respectivas con un patrón helicoidal opuesto. La bobina de fase y la columna de alta permeabilidad correspondiente son, con preferencia, sustancialmente concéntricas. La primera y la segunda columnas de alta permeabilidad pueden incluir una sección transversal que tenga un segmento alargado, estando los segmentos alargados dispuestos de una

manera sustancialmente opuesta.

En realizaciones preferidas, el blindaje eléctricamente conductor encapsula sustancialmente las bobinas de fase. En realizaciones preferidas, la primera y la segunda bobinas de fase están preferiblemente alineadas y tienen sus puntos medios en un plano común. La primera y la segunda bobinas de fase son preferiblemente adyacentes entre sí y están arrolladas en sentidos opuestos.

Conforme a un aspecto adicional de la presente invención, se proporciona un método de supresión de un diferencial de tensión durante una condición de corriente cero de acuerdo con la reivindicación 7.

El apantallamiento o blindaje puede estar colocado entre las bobinas de fase y la unidad de saturación magnética con el fin de reducir el flujo de CA en las proximidades de la unidad de saturación magnética. El apantallamiento electromagnético puede estar separado de la estructura o del sistema dieléctrico del FCL. En algunas disposiciones, el apantallamiento electromagnético puede ser integral con la estructura o sistema dieléctrico del FCL. En otras disposiciones, el apantallamiento electromagnético puede ser incorporado en un material o una estructura en su caso no magnética o no conductora, tal como un tanque de material compuesto que comprenda ya sea la estructura mecánica y/o ya sea parte del sistema dieléctrico de un FCL. En otras disposiciones, el apantallamiento electromagnético puede estar separado de un material o estructura en su caso no magnética o no conductora, tal como un tanque de material compuesto que comprenda ya sea la estructura mecánica y/o ya sea parte del sistema dieléctrico de un FCL.

En una realización, el apantallamiento electromagnético está entre la unidad de saturación magnética y las bobinas de fase.

En una realización, el apantallamiento electromagnético incluye dos sub-apantallamientos que se extienden alrededor de bobinas de fase respectivas.

En una realización, las columnas son sustancialmente paralelas y se extienden longitudinalmente.

En una realización, la unidad de saturación magnética genera un campo magnético, las columnas son adyacentes entre sí y están dispuestas dentro del campo magnético, y las bobinas de fase están arrolladas en sentidos opuestos.

En una realización, la unidad de saturación magnética incluye dos dispositivos de generación de campo magnético longitudinalmente separados para generar el campo magnético, y el apantallamiento electromagnético se extiende longitudinalmente de forma continuada entre los dispositivos de generación de campo magnético.

En una realización, el limitador de corriente de falla incluye:

- un primer yugo dispuesto en un primer extremo de la primera y la segunda columnas de alta permeabilidad, y
- un segundo yugo dispuesto en un segundo extremo de la primera y la segunda columnas de alta permeabilidad, de tal modo que el primer y el segundo yugos y la primera y la segunda columnas de alta permeabilidad forman una disposición de núcleo cerrado.

Como ejemplo, un método de limitación de una corriente de carga incluye las etapas de:

- proporcionar una primera columna de alta permeabilidad;
- proporcionar una segunda columna de alta permeabilidad;
- disponer una primera bobina de fase alrededor de la primera columna de alta permeabilidad;
- disponer una segunda bobina de fase alrededor de la segunda columna de alta permeabilidad;

permitir que fluya una corriente de carga a través de la primera bobina de fase y de la segunda bobina de fase;

proporcionar un apantallamiento electromagnético para suprimir la magnitud de la derivada temporal de la corriente de carga, y

polarizar magnéticamente las columnas de tal modo que las bobinas de fase cambien desde un estado de baja impedancia a un estado de alta impedancia en respuesta a una o más características de la corriente de carga.

Breve descripción de los dibujos

Sin perjuicio de otras formas cualesquiera que puedan caer dentro del alcance de la presente invención, las formas

preferidas de la invención van a ser descritas a continuación, a título de ejemplo solamente, con referencia a los dibujos que se acompañan, en los que:

La Figura 1 ilustra una primera disposición de FCL de núcleo saturado con el circuito de polarización de CC;

La Figura 2 ilustra una vista en sección a través de la disposición de la Figura 1;

5 La Figura 3 ilustra una vista en corte de porciones de un FCL de la Figura 1;

La Figura 4 es una vista en sección que ilustra la utilización de un apantallamiento en torno a las bobinas de fase de un FCL;

La Figura 5 es un gráfico de ejemplos de respuestas de falla para un FCL no apantallado y uno apantallado;

La Figura 6 es un gráfico que ilustra el comportamiento de limitación de corriente de falla de un FCL apantallado;

10 La Figura 7 es un gráfico que ilustra la derivada temporal del comportamiento de la corriente de falla de un FCL apantallado en comparación con un FCL no apantallado;

La Figura 8 ilustra la corriente de transformador inducida dentro de un apantallamiento de FCL durante una falla;

La Figura 9 detalla la forma de onda de densidad de flujo magnético en el centro de uno de los núcleos de alta permeabilidad durante la falla, con y sin apantallamiento electromagnético de FCL presente en el mismo;

15 La Figura 10 muestra la tensión medida inducida a través de los terminales del limitador de corriente de falla con y sin el apantallamiento electromagnético presente en el mismo;

La Figura 11 detalla la tensión medida inducida a través de los terminales del dispositivo de FCL y de una bobina de fase individual de CA del FCL cuando no está presente el apantallamiento electromagnético;

20 La Figura 12 detalla las formas de onda de la tensión transitoria inducida a través de los terminales del dispositivo de FCL y de una bobina de fase de CA individual del FCL cuando está presente el apantallamiento electromagnético, y

La Figura 13 ilustra la forma de onda de la tensión de terminal del FCL superpuesta con la forma de onda de corriente de transformador inducida en el apantallamiento durante la falla con una apantallamiento presente.

Descripción detallada de la invención

En las realizaciones preferidas de la presente invención se proporciona un limitador de corriente de falla mejorado.

25 La construcción y el desarrollo de dispositivos limitadores de corriente de falla, es decir de FCL, ha conducido a un número de avances en cuanto a la construcción de los mismos.

En particular, ventajas significativas en cuanto a diseños de FCL de núcleo saturado en los que las semifases eléctricas se sitúan adyacentes a, y en oposición de, cada una con la otra, dan como resultado diseños prácticos, efectivos y eficientes. Además, se ha encontrado que la incorporación de un apantallamiento conductor electromagnético alrededor de las semifases conduce a la supresión a nivel de di/dt en el FCL durante los cruces de la corriente por cero en un entorno de corriente alterna. La discusión de estos efectos se realiza a continuación.

30 Inicialmente, en la Figura 1 se ha ilustrado un primer limitador 1 de corriente de falla, con dos semifases 2, 3 eléctricas arrolladas alrededor de núcleos 5, 6 de alta permeabilidad laminados correspondientes. Bobinas 7, 14 de polarización de CC, las cuales, por motivos de conveniencia, fueron construidas usando conductor de cobre en el prototipo, fueron proporcionadas para polarizar el núcleo hacia saturación durante las condiciones normales de no falla.

35 Se apreciará que el término "arrollado" según se usa en la presente descripción, a menos que el contexto indique claramente otra cosa, en un sentido post-construcción. Es decir, el hecho de decir que "las semifases están arrolladas alrededor de núcleos 5, 6" no limita este término a aquellos FFCLs en los que las semifases se bobinan *in situ* en los núcleos, sino que incluye también aquellas semifases que están bobinadas alrededor de uno o más formadores y colocadas a continuación de modo que queden dispuestas alrededor de los núcleos.

40 Aunque los núcleos 5, 6 están en una disposición de núcleo abierto en la realización de la Figura 1, se apreciará que otras realizaciones de la invención incluyen disposiciones de núcleo cerrado. Por ejemplo, en una realización alternativa, dos yugos de acero laminado que están separados verticalmente, están dispuestos en los extremos de los núcleos 5, 6 de tal modo que los yugos y los núcleos 5, 6 forman una disposición de núcleo cerrado. En una realización alternativa adicional, dos yugos de acero laminado que están separados verticalmente, están dispuestos entre, y en, los extremos de los núcleos 5, 6, de tal modo que los yugos y los núcleos 5, 6 forman una disposición de núcleo cerrado.

- En diseños tales como los ilustrados en la Figura 1, los puntos medios de las bobinas 2, 3 de CA y de los núcleos 5, 6 de hierro, están todos situados en el mismo plano, y las bobinas de CA y los núcleos de hierro están dispuestos de una manera tan apretada y compacta como sea posible en conformidad con los requisitos de juego electrostático para el esquema dieléctrico elegido. Según se muestra en la Figura 2, tales disposiciones incluyen, aunque sin limitación, dos bobinas 2, 3 de CA con núcleos 5, 6 concéntricos de material de alta permeabilidad con secciones transversales “en forma de D” dispuestos con las zonas planas de los núcleos en forma de “D” adyacentes y paralelas entre sí con el fin de acoplar tanto las bobinas de CA como los núcleos en el interior de un cilindro 15 para un dispositivo de fase única.
- En otras realizaciones, se apreciará que las secciones transversales de los núcleos 5,6 tienen una forma distinta de la “forma de D”.
- La Figura 3 ilustra una vista en corte de la disposición de la Figura 1 que ilustra las cuatro bobinas 7-14 de CC alrededor de dos columnas 5, 6 de alta permeabilidad de acero laminado, alrededor de las cuales se han arrollado dos bobinas 2, 3 de fase de CA que están conectadas eléctricamente en serie.
- En un sistema correspondiente de tres fases, se pueden proporcionar seis bobinas de CA “en forma de cometa” o “en forma de tarta” alrededor de núcleos concéntricos de material de alta permeabilidad dispuestos radialmente con sus puntas juntas y paralelas a un eje central, con semifases respectivas opuestas entre sí, con el fin de acoplarlas de forma compacta en el interior de un cilindro para un dispositivo de tres fases.
- Se consideró que tales disposiciones y otras potenciales disposiciones similares estaban electromagnéticamente equilibras ya que se encontró que la densidad de flujo en los núcleos de alta permeabilidad procedente de las corrientes de falla contrarrestan cada una a la otra en el agregado y anulan en gran medida cada una a la otra cuando el PCL resultante se ve como un conjunto, incluso la densidad de flujo resultante de las corrientes de falla en cada bobina de CA de una fase actúa individualmente sobre sus respectivos núcleos de alta permeabilidad y limitan eficazmente la corriente de falla en cada semiciclo de la corriente de falla.
- Las ventajas de este diseño incluyen, aunque sin limitación: fuerzas electromagnéticas considerablemente reducidas que deben ser tenidas en cuenta en el diseño mecánico y eléctrico del FCL; acoplamiento considerablemente reducido entre las bobinas de CA y las bobinas de saturación magnética de CC en el FCL; tensiones mucho más bajas inducidas en las bobinas magnéticas de saturación de CC durante condiciones de falla, y flujos de CA mucho más bajos en la periferia de las bobinas de CA y en los núcleos de material de alta permeabilidad, lo que reduce las pérdidas de CA y la carga de calor resultante dentro de las bobinas magnéticas de saturación de CC.
- Por lo tanto, se encontró inicialmente que era ventajoso proporcionar semifases eléctricas que sean adyacentes entre sí y con orientación opuesta. Por supuesto, son posibles otras disposiciones con las consiguientes variaciones de eficiencia.
- También se incorporaron ventajas adicionales. Durante el uso de un FCL en un sistema de distribución eléctrica, las consideraciones de diseño y clasificación de ruptores de circuito requieren que la corriente de falla de CA que pueda ser interrumpida de manera fiable y segura por medio de un ruptor de circuito, esté caracterizada por una corriente de falla de pico y un valor máximo de la di/dt o la velocidad temporal de cambio de la corriente en el cruce por cero de la corriente de falla. Si un FCL proporciona la reducción del pico de corriente de falla, pero la di/dt resultante en el cruce por cero de la forma de onda de la corriente de falla no se reduce correspondientemente, entonces la capacidad del ruptor de circuito para interrumpir la corriente de falla reducida o limitada resultante en un sistema de distribución eléctrica se ve comprometida, y el ruptor de circuito debe ser reducido eléctricamente. Revisado, si la relación entre la corriente de falla de pico limitado y la di/dt de la corriente de falla de pico limitado en el cruce por cero de la corriente de falla no cumplen determinados parámetros, las autoridades reguladoras pueden estimar que la corriente de falla de pico limitado no puede ser usada como valor de diseño para determinar si un ruptor de circuito, con una valoración particular de interrupción de corriente de pico, puede operar o no de forma segura.
- Por ejemplo, suponiendo que un circuito particular tenga una corriente de falla de pico de 50 kA, pero esté equipado con ruptor de circuito que tenga una clasificación de interrupción de 40 kA, y que se haya de instalar un limitador de corriente de falla para limitar la corriente de falla de pico a 39 kA, lo que podría estar por debajo de la clasificación de interrupción nominal del ruptor de circuito existente. A menos que la di/dt de la corriente de falla de pico limitada de 39 kA se reduzca apropiadamente a partir de la di/dt de la corriente de falla de 50 kA no limitada de pico, la corriente de falla de pico limitada de 39 kA puede no estar dentro de la clasificación de interrupción segura del ruptor de circuito existente, y dependiendo del valor real de di/dt de la corriente de falla de pico limitada, puede ser necesario limitar la corriente de falla de pico para que sume otro valor, tal como 35 kA, con el fin de asegurar una interrupción segura. Esto se conoce como “desclasificación” del ruptor de circuito existente.
- Las investigaciones realizadas por los presentes inventores han puesto de relieve que la utilización de un apantallamiento electromagnético conductor alrededor de las bobinas en un diseño de FCL de núcleo saturado, actúa de modo que reduce el valor de di/dt en el cruce por cero de la corriente. Normalmente, en disposiciones de la técnica anterior, la di/dt de la corriente de falla de pico limitado no cambiará o puede incluso incrementarse según se reduce la corriente de falla de pico, lo que requerirá una “desclasificación” de los ruptores de circuito en el circuito

eléctrico asociado. Pruebas exhaustivas han mostrado también que si se emplea un apantallamiento electromagnético conductor en un FCL de núcleo saturado con la arquitectura adyacente y orientada de manera opuesta descrita con anterioridad, se mejora el rendimiento del FCL de núcleo saturado.

5 Las pruebas han demostrado que el apantallamiento electromagnético puede ser una estructura o tanque conductor, pero no magnético, que también puede ser integral con la estructura mecánica del FCL de núcleo saturado o con el sistema dieléctrico del FCL.

10 De forma similar, los componentes de las estructuras de FCL de material compuesto o de otro material no conductor o del sistema dieléctrico no proporcionarán el mismo grado de reducción beneficiosa de la di/dt de la corriente de falla de pico limitado en el cruce por cero y dará como resultado un FCL de núcleo saturado que no es óptimo ni requiere desclasificación de los ruptores de circuito asociados.

15 La Figura 4 ilustra la colocación de un apantallamiento 21 electromagnético alrededor de la disposición de la Figura 3. Se encontró que diferentes formas de apantallamientos pueden ser eficaces. En los ejemplos probados, se encontró que tanto un apantallamiento de acero inoxidable 316 laminado de 9 mm de espesor como un apantallamiento de cobre de grado eléctrico de 0,9 mm de espesor fueron efectivos. Sin embargo, según la presente invención, el apantallamiento electromagnético está hecho de cobre.

20 Se apreciará que también se usa un apantallamiento electromagnético en las realizaciones alternativas que tienen disposiciones de núcleo cerrado, descritas con anterioridad. Por ejemplo, en una realización que tiene dos yugos de acero laminado separados verticalmente en los extremos de los núcleos 5, 6, de tal modo que los yugos y los núcleos 5, 6 forman una disposición de núcleo cerrado, un apantallamiento electromagnético se coloca o se forma alrededor de las bobinas 2, 3 de CA. En algunas realizaciones, el apantallamiento electromagnético se coloca o se forma también alrededor de los yugos.

25 En otras realizaciones, el apantallamiento electromagnético no se coloca ni se forma alrededor de los yugos. En una realización, el apantallamiento electromagnético se coloca o se forma alrededor de las bobinas 2, 3 de CA y de los núcleos 5, 6 de tal modo que los yugos quedan situados por fuera del apantallamiento. En una realización, el apantallamiento electromagnético está situado o formado alrededor de las bobinas 2, 3 de CA y de los núcleos 5, 6 de tal modo que las porciones extremas de los núcleos 5, 6 que están en contacto con los yugos se sitúan por fuera del apantallamiento.

Se apreciará que el concepto de usar yugos en los ejemplos de las disposiciones de núcleo cerrado de fase única que se han discutido con anterioridad, se usan también en sistemas correspondientes de tres fases.

30 Se emprendió la caracterización del FCL con y sin cada apantallamiento bajo las mismas condiciones experimentales. Las Figuras 5 a 12 ilustran los resultados de una caracterización de ese tipo en cuanto al funcionamiento de un FCL bajo condiciones de corriente de falla.

En la Figura 5, se han ilustrado los resultados de una simulación de falla para varios diseños de entrada. Los detalles de este FCL se muestran en la Tabla 1:

35

Tabla 1

Parámetro	Abrev.	Unidad	Valor
Tensión de fuente	V_s	kV	1,5
Corriente prospectiva de falla	I_f	kA	15
Corriente de falla limitada	I_f'	kA	8,2
Área en sección transversal de cada poste de núcleo de alta permeabilidad	A_{CORE}	m^2	0,038
Altura de los núcleos de acero	H_{CORE}	m	1,800
Número de espiras de CA en cada poste de núcleo de alta permeabilidad	N_{AC}		23
Altura de las bobinas de CA	H_{AC}	m	1,457
Conductor de cobre empleado para construir las bobinas de CA		mm	14 x 4
Polarización de CC aplicada al FCL	N_{DC}	kAT	230
Número de espiras de bobina de CC en total	N_{DC}		784
Conductor de cobre empleado para construir bobinas de CC		mm	14 x 4
Altura del apantallamiento	H_{Shield}	m	1,650
Espesor del apantallamiento de acero inoxidable	t_{SS}	mm	9
Espesor del apantallamiento de cobre	t_{Cu}	mm	0,9 mm

Una corriente de falla prospectiva de estado estable de 15 kA RMS (falla de pico de 24 kA) se simula que ocurre en el punto 54. La corriente de falla prospectiva medida se obtiene sacando el limitador de corriente de falla fuera del circuito de prueba, causando una falla, y recopilando los datos, lo que se ha representado posteriormente con 51. La curva 52 ilustra la corriente de falla reducida medida con un limitador de corriente de falla con un diseño tal como el indicado en la Figura 1. La curva 53 ilustra la corriente de falla resultante cuando se incorpora un apantallamiento electromagnético en el diseño de FCL tal como el que se ha ilustrado en la Figura 4. Se puede apreciar que ha existido una reducción sustancial 55 en el nivel de la corriente de falla de estado estable, desde aproximadamente 15 kA RMS hasta 7,35 kA RMS. Adicionalmente, el primer pico en la forma de onda 51 de corriente de falla prospectiva se ha reducido desde un valor de 24 kA a 14 kA cuando el apantallamiento electromagnético está incluido 53. Cuando el apantallamiento electromagnético no está incluido, se observó que el primer pico se había reducido solamente a 18 kA. Los expertos en la materia podrán apreciar que las reducciones en el primer pico en la forma de onda de corriente de falla tiene ventajas para mitigar las fuerzas mecánicas máximas sobre un equipo eléctrico sometido a la corriente de falla.

La Figura 6 ilustra una porción de la corriente de falla de estado estable con más detalle para el caso sin FCL y con FCL apantallado. Se midió la corriente de falla para el mismo circuito de prueba de corriente de falla prospectiva de estado estable de 15 kA RMS, donde la curva 60 que ilustra la corriente de falla sin ningún FCL y la curva 61 ilustra la corriente de falla con el FCL apantallado en el circuito de prueba, que indica la reducción sustancial de corriente de falla y que la reducción de corriente de falla en estado estable se mantiene a pesar de la presencia del apantallamiento. De forma interesante, una anomalía significativa ha ocurrido en el caso apantallado en el punto 62 de cruce por cero.

También fueron tomadas las mediciones de di/dt correspondientes de la Figura 6, y han sido ilustradas en la Figura 7. La Figura 7 ilustra el resultado de tales mediciones. La curva 71 ilustra la forma de onda de di/dt sin el FCL en el circuito de prueba. La curva 72 representa la forma de onda de corriente de di/dt medida con una disposición de FCL no apantallado en el circuito de prueba. La curva 73 representa la forma de onda de corriente de di/dt con un apantallamiento de acero inoxidable de 9 mm incorporado en el FCL. El punto de cruce por cero correspondiente de la corriente se produce sobre el eje del tiempo en el punto 74. Se puede apreciar que la utilización del apantallamiento reduce sustancialmente el valor 73 de di/dt en el punto 74 correspondiente de cruce por cero de la corriente en comparación con el caso 72 de FCL no apantallado.

Sin pretender quedar limitados por la teoría, la corriente de transformador inducida en el apantallamiento actúa para suprimir la di/dt en el cruce por cero de la corriente.

La Figura 8 detalla la corriente 81 de transformador medida, inducida en el apantallamiento durante el evento de corriente de falla. La Figura 9 detalla la forma de onda de densidad de flujo magnético en el centro de uno de los núcleos de alta permeabilidad durante la falla cuando el FCL no tiene presente ningún apantallamiento 91, y cuando está presente 92 un apantallamiento de acero inoxidable de 9 mm de espesor. Como puede apreciarse, el momento del pico en la densidad de flujo ha cambiado desde 93 a 94 y se ha desplazado 2 milisegundos. La forma de onda de flujo completa ha cambiado también de forma entre el caso en que el apantallamiento no está presente 91 y cuando el apantallamiento está presente 92.

La corriente de apantallamiento inducida y la forma de onda de densidad de flujo alterada en los núcleos de alta permeabilidad, tienen un número de efectos beneficiosos sobre la operación detallada del limitador de corriente de falla. La Figura 10 muestra la tensión medida inducida a través de los terminales del limitador de corriente de falla cuando no está presente 101 el apantallamiento y cuando está presente 102 el apantallamiento en el limitador de corriente de falla. Debe entenderse que la Figura 10 muestra la forma de onda de tensión total medida a través de ambas bobinas de CA en serie del limitador de corriente de falla.

Los expertos en la materia comprenderán que la funcionalidad del limitador de corriente de falla de núcleo saturado se origina a partir de la tensión que se induce a través de las bobinas de CA durante la falla. Las mediciones de esas curvas de tensión transitoria durante la falla sin que el apantallamiento esté presente 101 y con el apantallamiento presente 102, muestran que los detalles del mecanismo de limitación de corriente de falla se ven significativamente afectados por el apantallamiento. En particular, la forma de la tensión inducida a través de los terminales del dispositivo de FCL es diferente, y en vez de que la tensión del terminal del limitador de corriente de falla tenga una forma con una depresión en la misma 101, tiene un pico 102 más grande.

Los expertos en la materia podrán apreciar que cada una de las formas de onda medidas consiste en la suma de las formas de onda de tensión transitoria a través de las dos bobinas de CA en serie del dispositivo limitador de corriente de falla, y estas pueden ser, y lo fueron, medidas individualmente. Estas formas de onda de bobinas de CA individuales han sido mostradas en las Figuras 11 y 12, respectivamente.

La Figura 11 detalla las formas de onda de la tensión inducida a través de los terminales del dispositivo de FCL cuando el apantallamiento no está presente 111 y la tensión a través de una bobina de CA individual del limitador de corriente de falla cuando el apantallamiento no está presente 112. Para añadir perspectiva y comprensión, una porción de la curva 112 ha sido señalada con 113 y ésta representa el efecto de la tensión inducida en el núcleo de aire en una única bobina de CA, y también para el caso en que el apantallamiento no está presente. Esta parte de la

forma de onda de tensión transitoria de bobina de CA se induce en la bobina de CA individual cuando el núcleo de alta permeabilidad se satura más en la región de campo magnético alto. Esta parte de la forma de onda inducida de bobina de CA podría ser obtenida incluso aunque no existiera ningún núcleo de acero y representa el efecto de la reactancia del núcleo de aire del limitador de corriente de falla. Como puede apreciarse, es de naturaleza sustancialmente sinusoidal como debería ser la respuesta de un reactor de núcleo de aire.

La Figura 12 detalla las formas de onda de la tensión transitoria inducida a través de los terminales del dispositivo de FCL cuando está presente 121 el apantallamiento electromagnético, y de la tensión a través de una bobina de CA individual del limitador de corriente de falla, también cuando está presente 122 el apantallamiento electromagnético. La porción de la tensión de bobina de CA individual que se induce por medio del efecto de núcleo de aire de la bobina de CA, ha sido mostrada también, 123.

Las tensiones transitorias de bobina de CA medidas detalladas con, y sin, apantallamiento, muestran que la presencia de un apantallamiento electromagnético bien diseñado ha alterado significativamente las características de los transitorios de tensión inducidos en las bobinas de CA y por consiguiente a través de los terminales de FCL. El apantallamiento ha eliminado la depresión característica en la forma de onda de tensión de terminal del limitador de corriente de falla 101 (Figura 10), 111 (Figura 11), y la ha sustituido por un pico más grande de tensión 121 inducida (Figura 12). Las formas de onda transitorias de tensión de bobina de CA individual a través de cada bobina de CA individual están ahora en fase unas con otras cuando el apantallamiento electromagnético está presente y esto está ocasionado directamente por la corriente de transformador inducida en el apantallamiento 81 y la consiguiente alteración de la forma de onda transitoria de densidad de flujo en el núcleo 92 de alta permeabilidad que resulta de este diseño.

Con el fin de facilitar la percepción en el mecanismo de la supresión de di/dt en el cruce por cero de la corriente, la Figura 13 detalla la forma de onda de tensión de terminal de FCL durante la falla con un apantallamiento presente 102 y la corriente 81 de transformador inducida de apantallamiento para el caso de un apantallamiento de acero inoxidable de 9 mm de espesor. Se puede apreciar que la corriente de transformador en el apantallamiento tiene picos que están en fase con el pico de la forma de onda de la tensión de terminal de FCL. La Figura 13 muestra la evidencia adicional de que los picos en la corriente de transformador del apantallamiento cuya fase cambia cada una de las formas de onda 122 de tensión de bobina de CA individual, produce a su vez un pico 102 de forma de onda de tensión más grande a través del FCL.

Se apreciará que el FCL, en algunas realizaciones, es un FCL de superconductor de alta temperatura (HTS). Sin embargo, en otras realizaciones, el FCL no es un FCL de HTS.

Interpretación

En la descripción que se proporciona en la presente memoria, se han definido numerosos detalles específicos. Sin embargo, se comprende que las realizaciones de la invención pueden ser puestas en práctica sin esos detalles específicos. En otros casos, los métodos, las estructuras y las técnicas bien conocidas no se han mostrado en detalle con el fin de no oscurecer la comprensión de la descripción.

Aunque la presente invención ha sido descrita con referencia particular a determinadas realizaciones preferidas de la misma, se pueden efectuar cambios y modificaciones de la presente invención dentro del alcance de las reivindicaciones que siguen.

REIVINDICACIONES

- 1.- Un limitador (1) de corriente de falla, es decir un FCL, que comprende un núcleo (5, 6) saturado de alta permeabilidad diseñado para estar saturado durante el uso normal,
 - 5 una primera columna (5) de alta permeabilidad;
una segunda columna (6) de alta permeabilidad;
una primera bobina (2) de fase dispuesta alrededor de la primera columna de alta permeabilidad;
una segunda bobina (3) de fase dispuesta alrededor de la segunda columna de alta permeabilidad, en
10 donde la primera bobina de fase y la segunda bobina de fase están adaptadas para transportar una corriente de carga;
una unidad (7 – 14) de saturación magnética para polarizar magnéticamente las columnas de tal modo que las bobinas de fase cambian desde un estado de baja impedancia a un estado de alta impedancia en respuesta a una o más características de la corriente de carga,
caracterizado por:
 - 15 un apantallamiento electromagnético hecho de cobre, para suprimir la magnitud de la deriva temporal de la corriente de carga;
estando el apantallamiento electromagnético formado alrededor de la primera bobina de fase y de la segunda bobina de fase.
 - 2.- Un limitador de corriente de falla según la reivindicación 1, en donde el apantallamiento electromagnético está
20 entre la unidad de saturación magnética y las bobinas de fase.
 - 3.- Un limitador de corriente de falla según la reivindicación 2, en donde el apantallamiento electromagnético incluye dos sub-apantallamientos que se extienden alrededor de bobinas de fase respectivas.
 - 4.- Un limitador de corriente de falla según la reivindicación 1, en donde las columnas son sustancialmente paralelas y se extienden longitudinalmente, y en donde:
 - 25 la unidad de saturación magnética está adaptada para generar un campo magnético;
las columnas son adyacentes entre sí y están dispuestas dentro del campo magnético, y
las bobinas de fase están arrolladas en sentidos opuestos.
 - 5.- Un limitador de corriente de falla según la reivindicación 4, en donde la unidad de saturación magnética incluye dos dispositivos de generación de campo magnético separados longitudinalmente para generar el campo magnético,
30 y el apantallamiento magnético se extiende de forma longitudinalmente continua entre los dispositivos de generación de campo magnético.
 - 6.- Un limitador de corriente de falla según la reivindicación 1, que incluye además:
 - y un primer yugo dispuesto en un primer extremo de la primera y la segunda columnas de alta permeabilidad,
35 un segundo yugo dispuesto en un segundo extremo de la primera y la segunda columnas de alta permeabilidad, de tal modo que el primer y el segundo yugos y la primera y la segunda columnas de alta permeabilidad forman una disposición de núcleo cerrado
 - 7.- Método de supresión de un diferencial de tensión durante una condición de corriente de falla cero, incluyendo el método la etapa de: utilizar el limitador de corriente de falla según la reivindicación 1.
 - 8.- Un método según la reivindicación 7, en donde el apantallamiento electromagnético está situado entre las bobinas de fase y la unidad de saturación magnética con el fin de reducir el flujo de CA en las proximidades de la unidad de saturación magnética.
 - 9.- Un método según la reivindicación 7, en donde el apantallamiento electromagnético está incorporado en un material o una estructura en su caso no magnética o no conductora, tal como un tanque de material compuesto que
45 comprende ya sea una estructura mecánica y/o ya sea parte de un sistema dieléctrico del FCL.
 - 10.- Un método según la reivindicación 7, en donde el apantallamiento electromagnético está separado del material

o la estructura en su cano no magnética o no conductora, tal como un tanque de material compuesto que comprende ya sea una estructura mecánica y/o ya sea parte de un sistema dieléctrico del FCL.

11.- Un método según la reivindicación 7, en donde el apantallamiento electromagnético actúa también para suprimir un primer pico transitorio en una forma de onda de corriente de falla durante una condición de falla.

5 12.- Un método según la reivindicación 7, en donde el limitador de corriente de falla incluye:

un primer yugo dispuesto en un primer extremo de la primera y la segunda columnas de alta permeabilidad,
y

10 un segundo yugo dispuesto en un segundo extremo de la primera y la segunda columnas de alta permeabilidad, de tal modo que el primer y el segundo yugos y la primera y la segunda columnas de alta permeabilidad forman una disposición de núcleo cerrado.

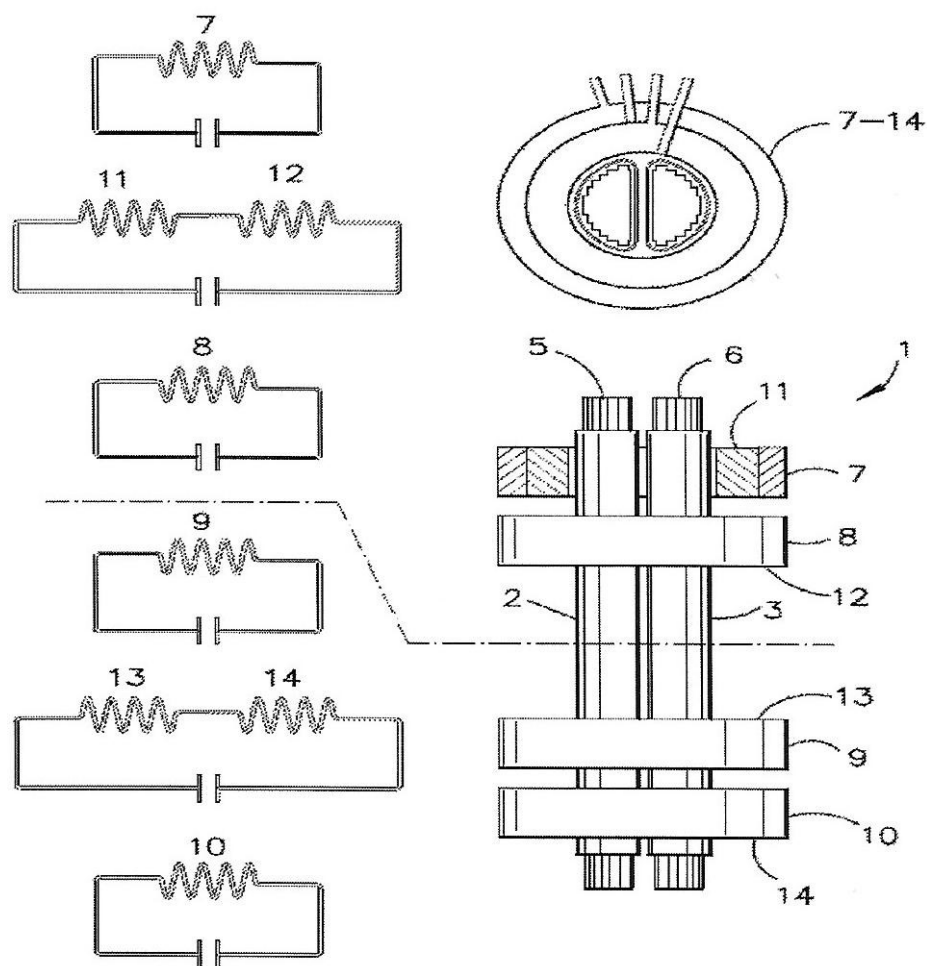


FIG. 1

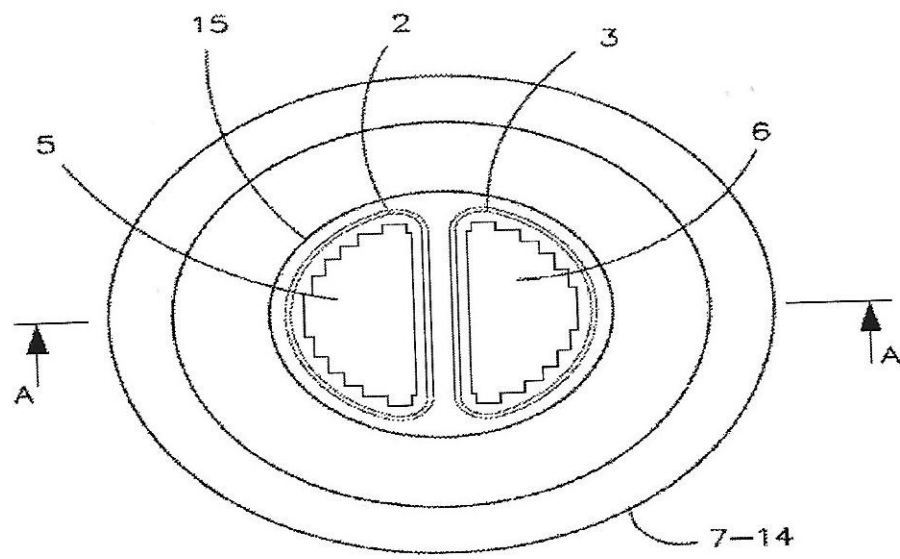


FIGURA 2

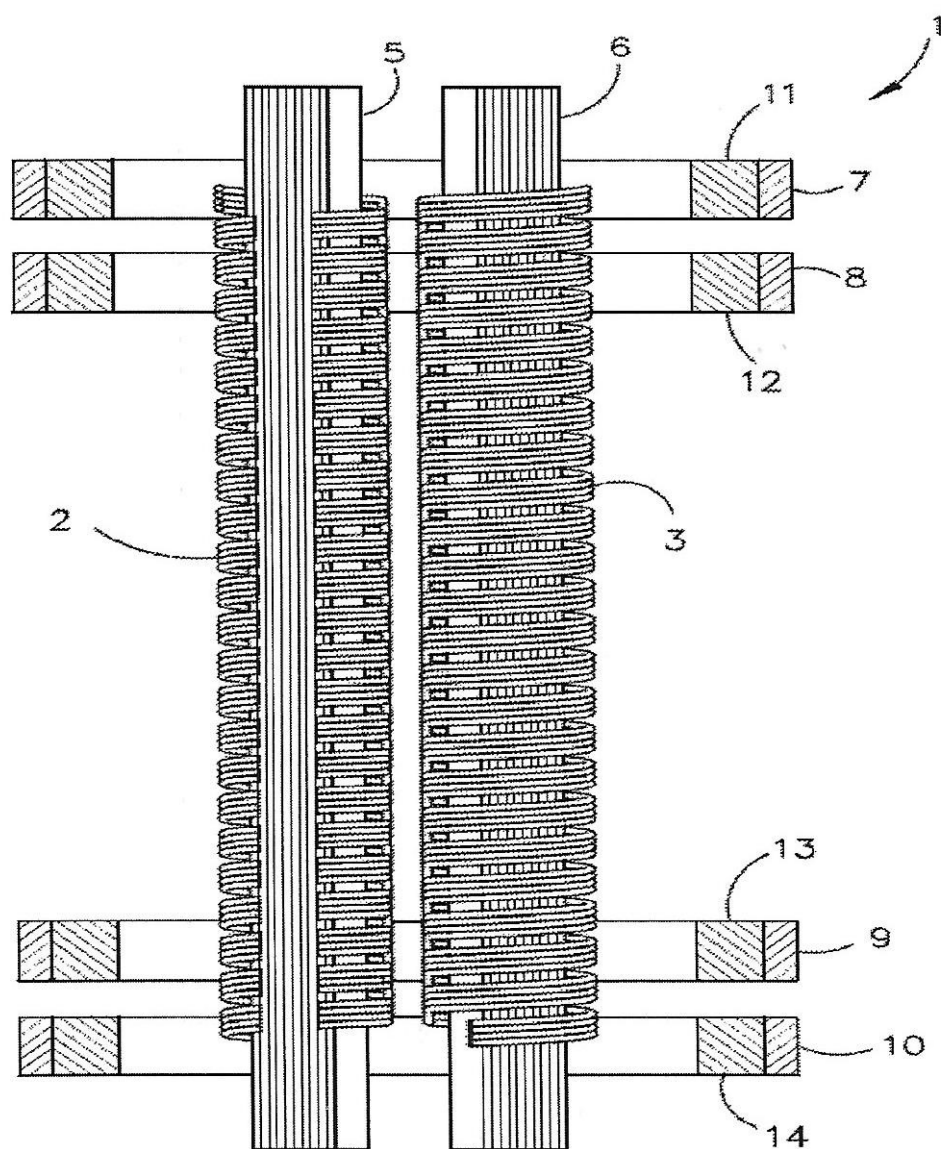
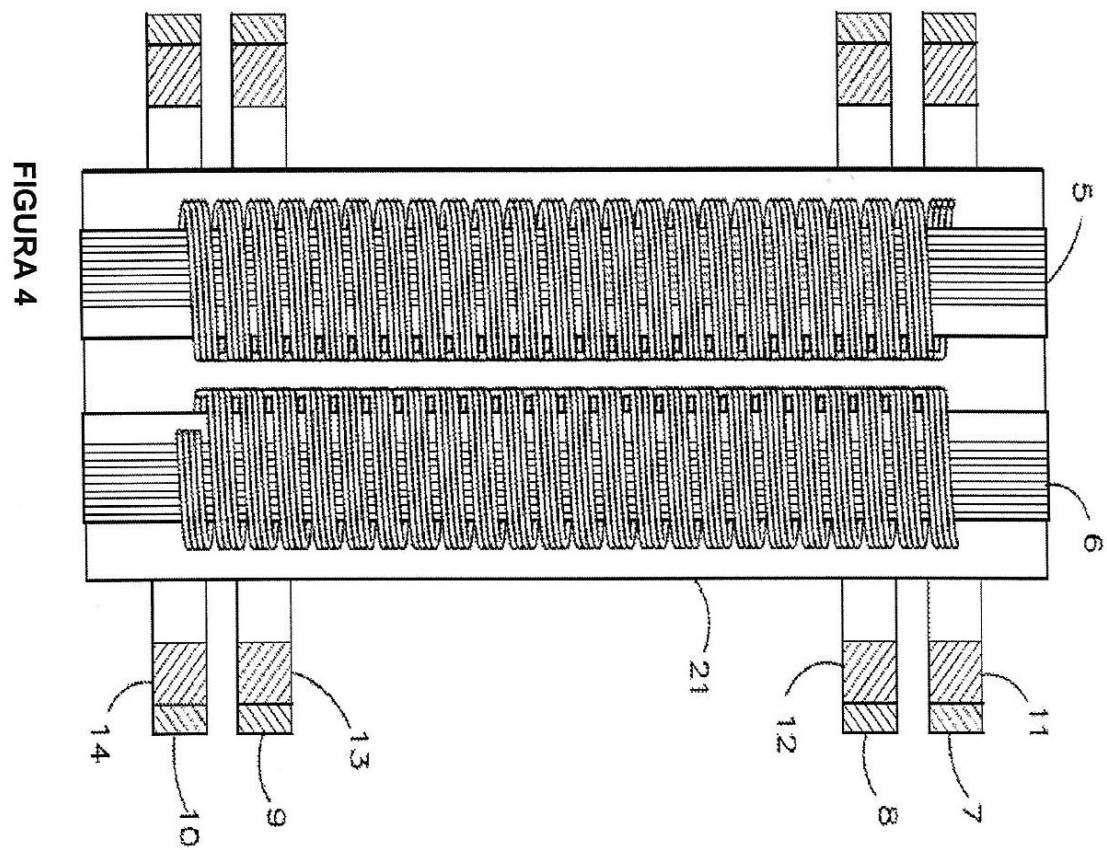


FIGURA 3



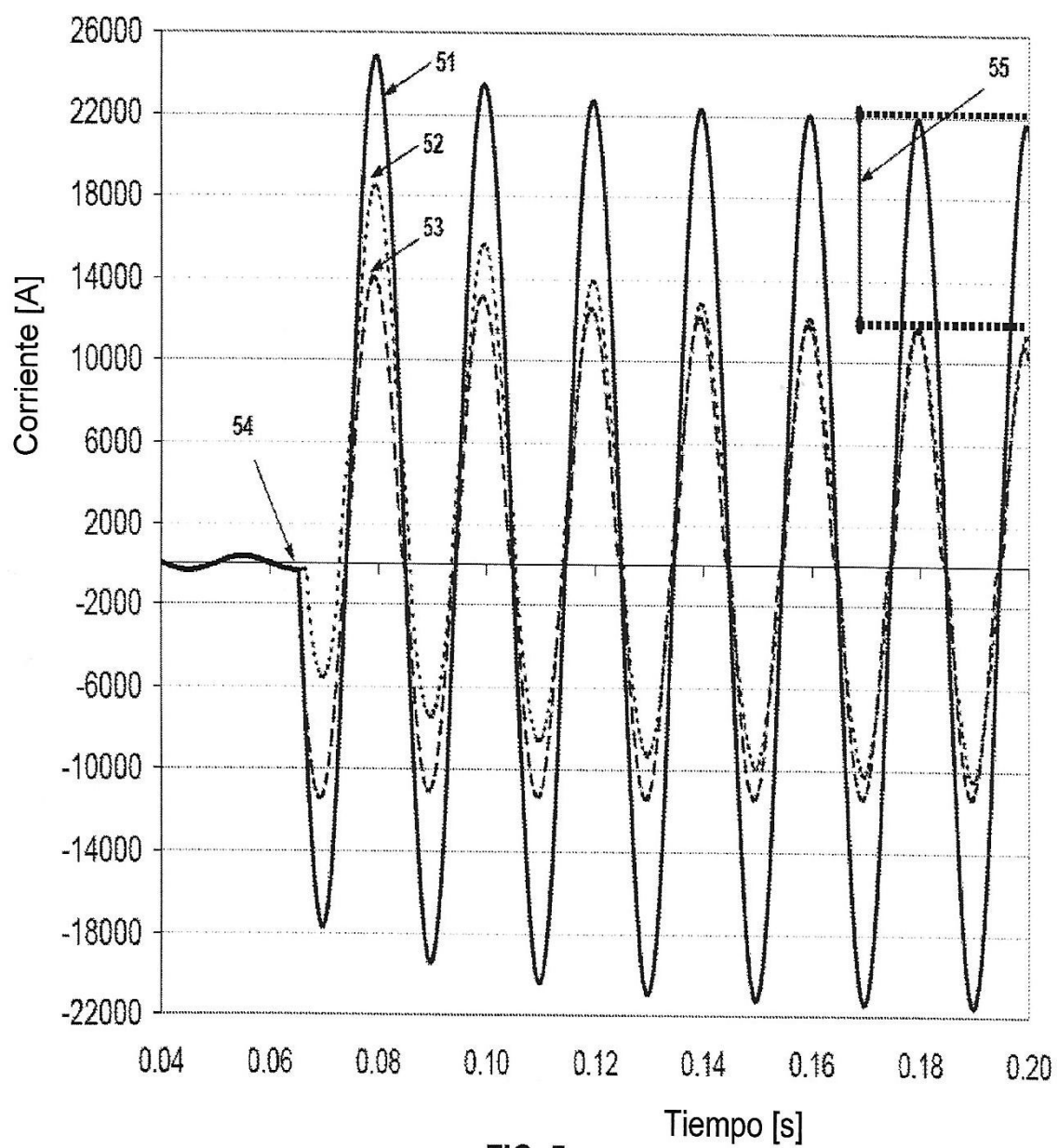


FIG. 5

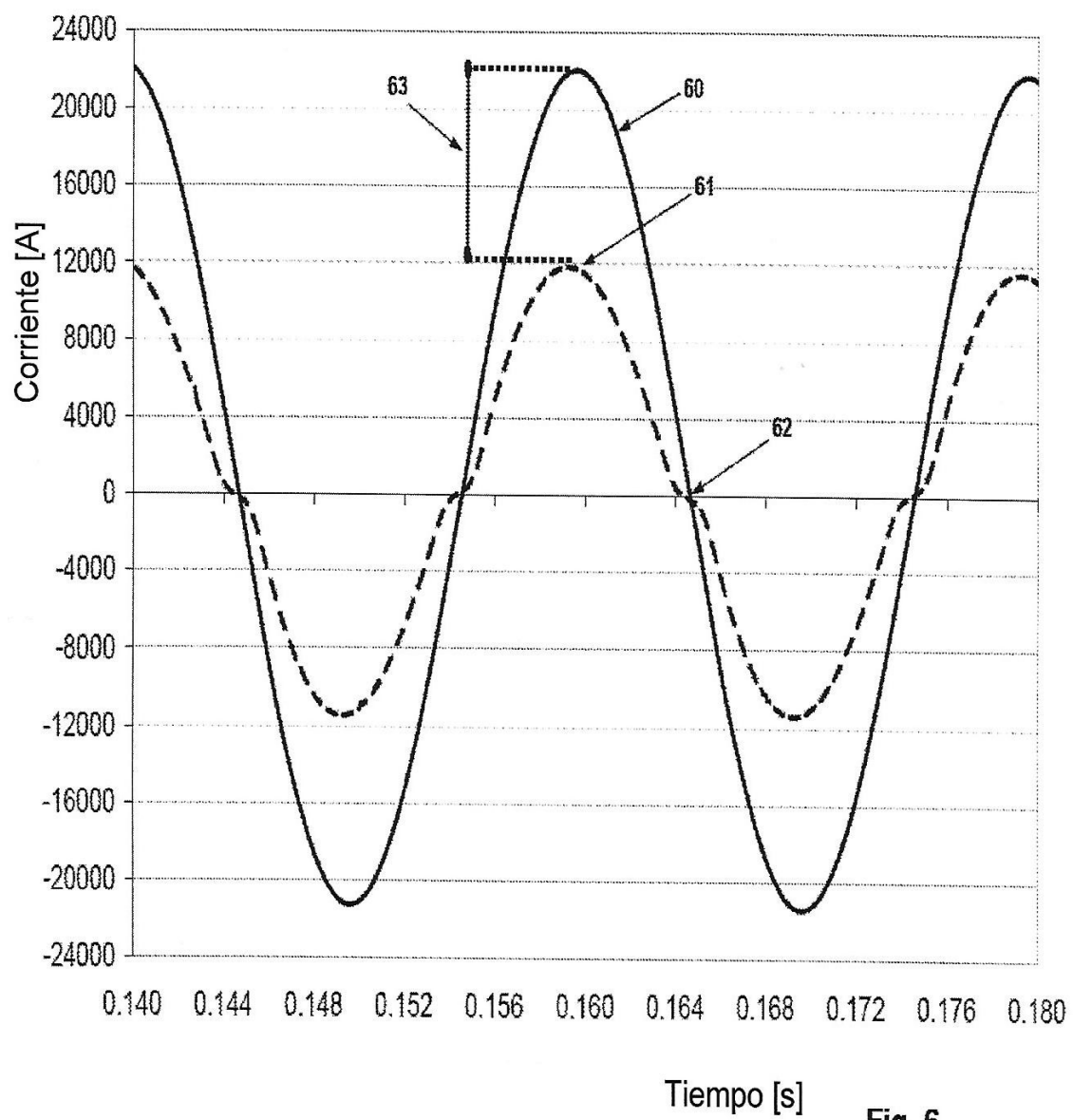


Fig. 6

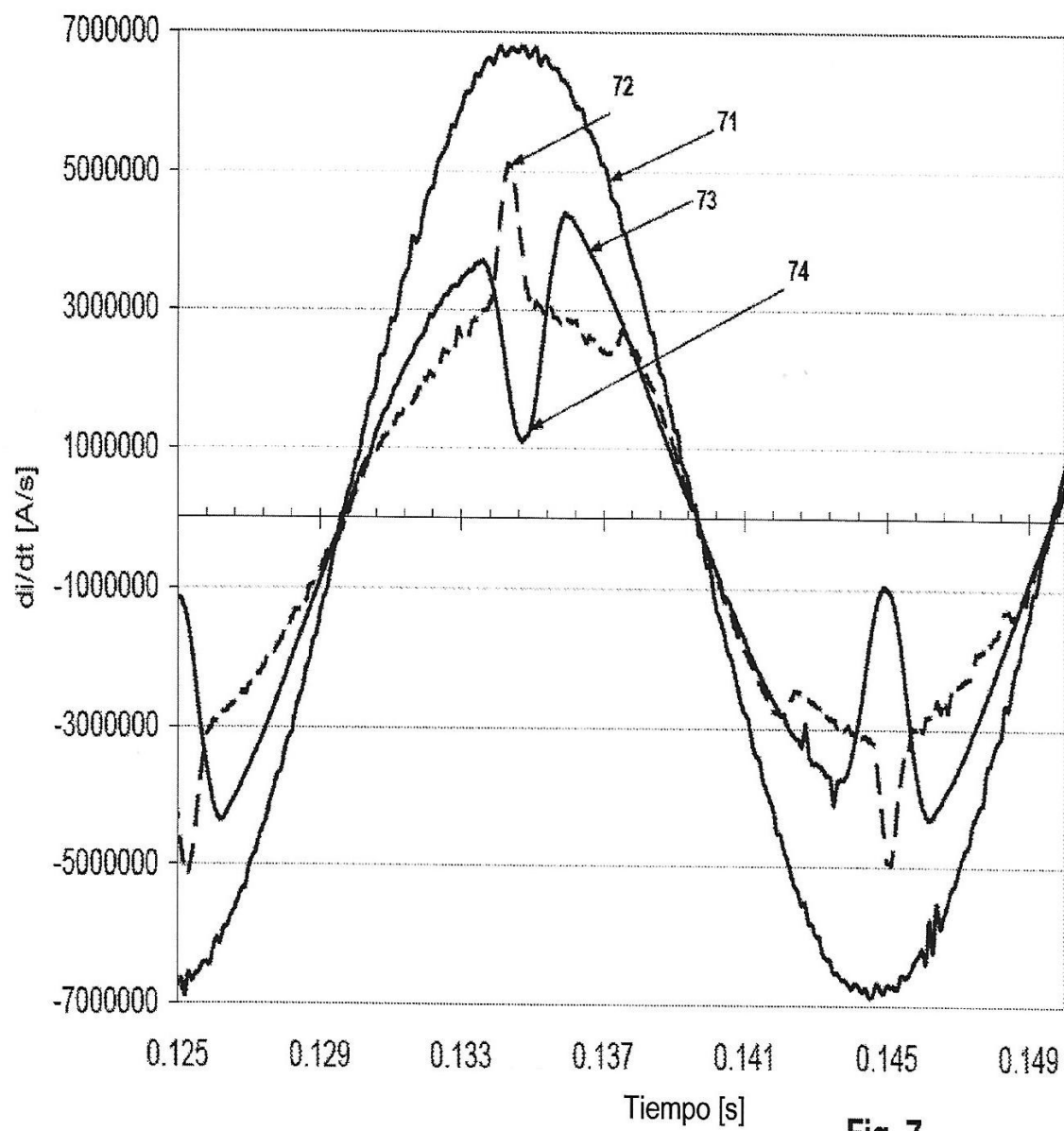
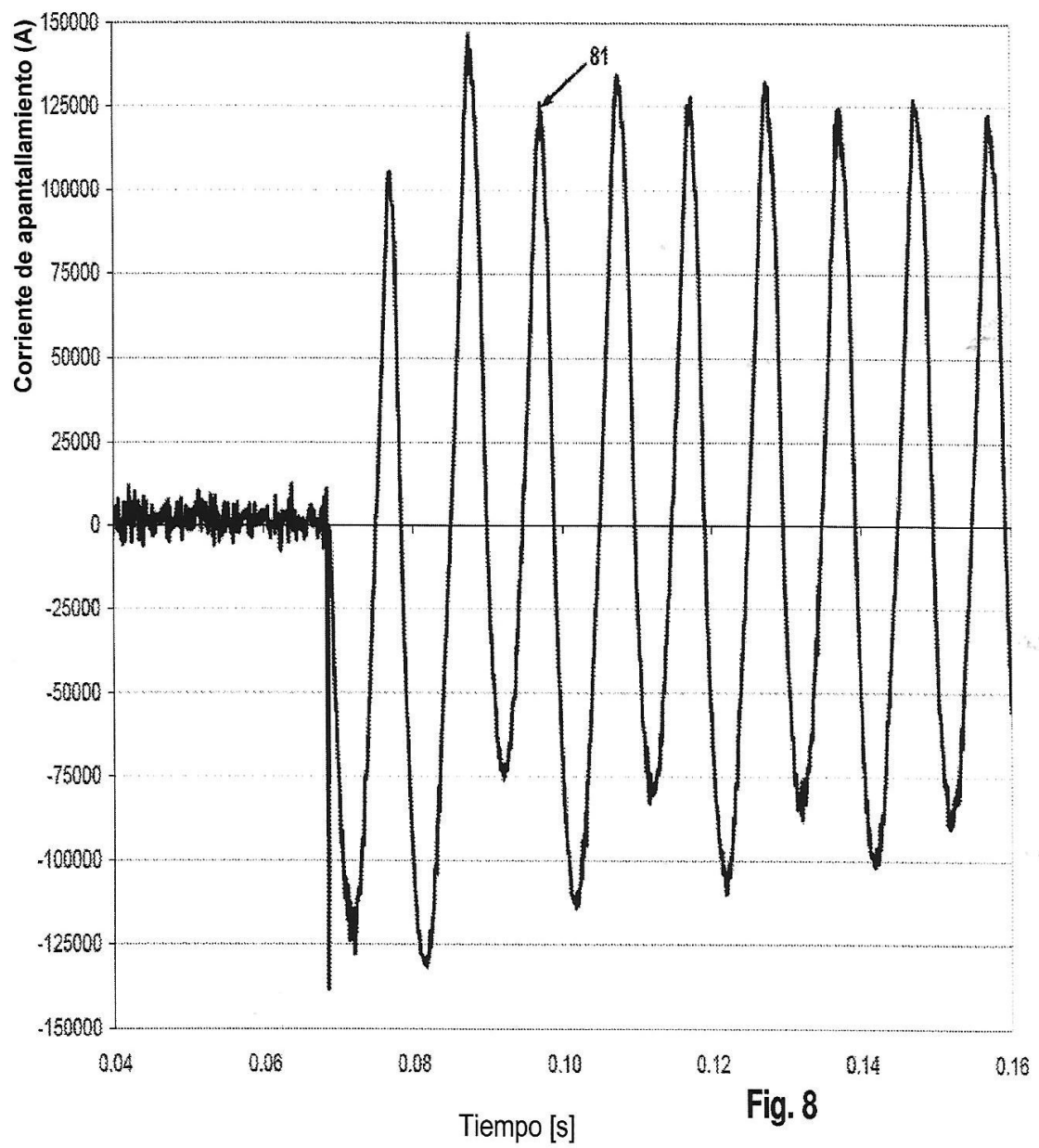
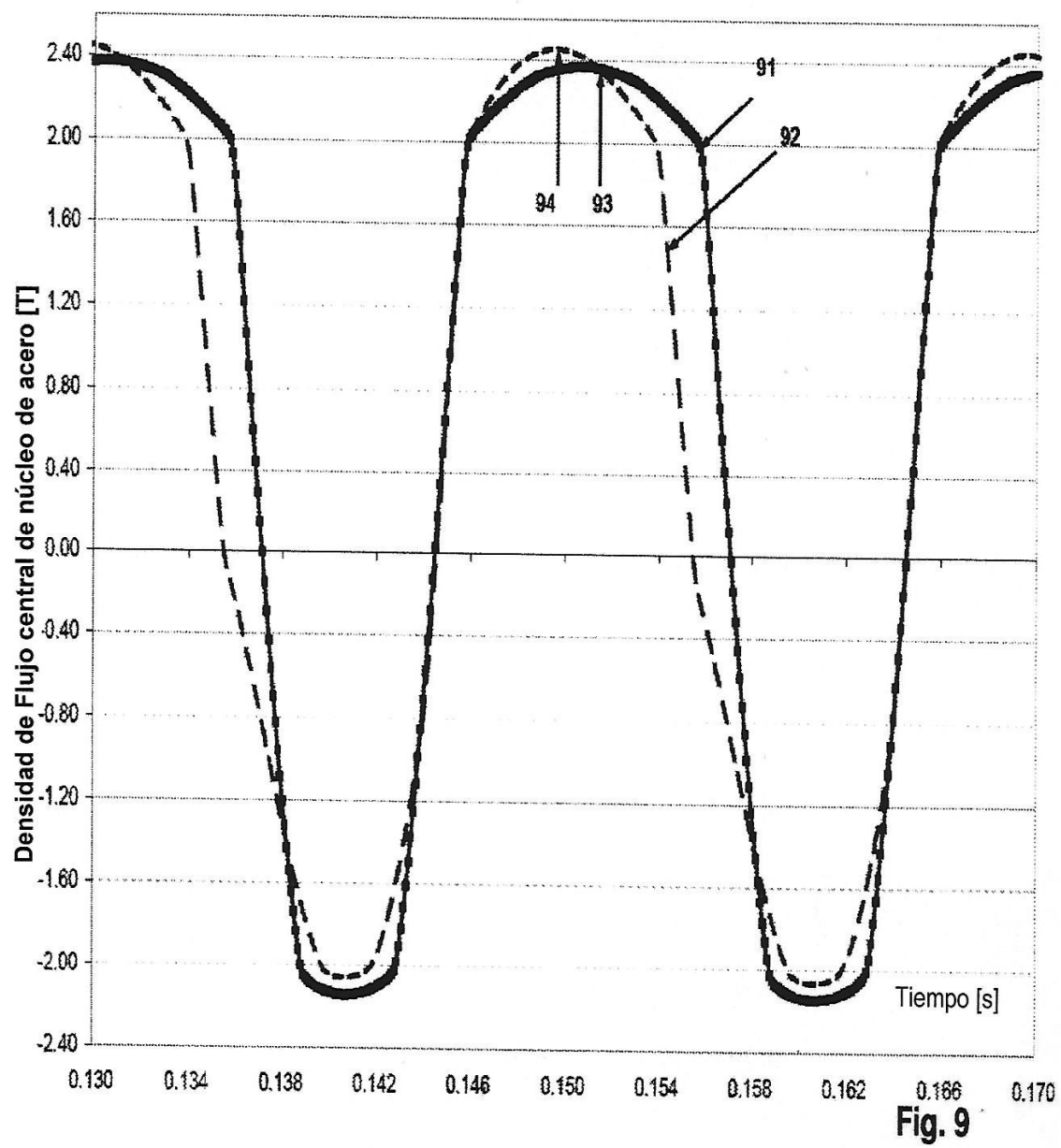


Fig. 7





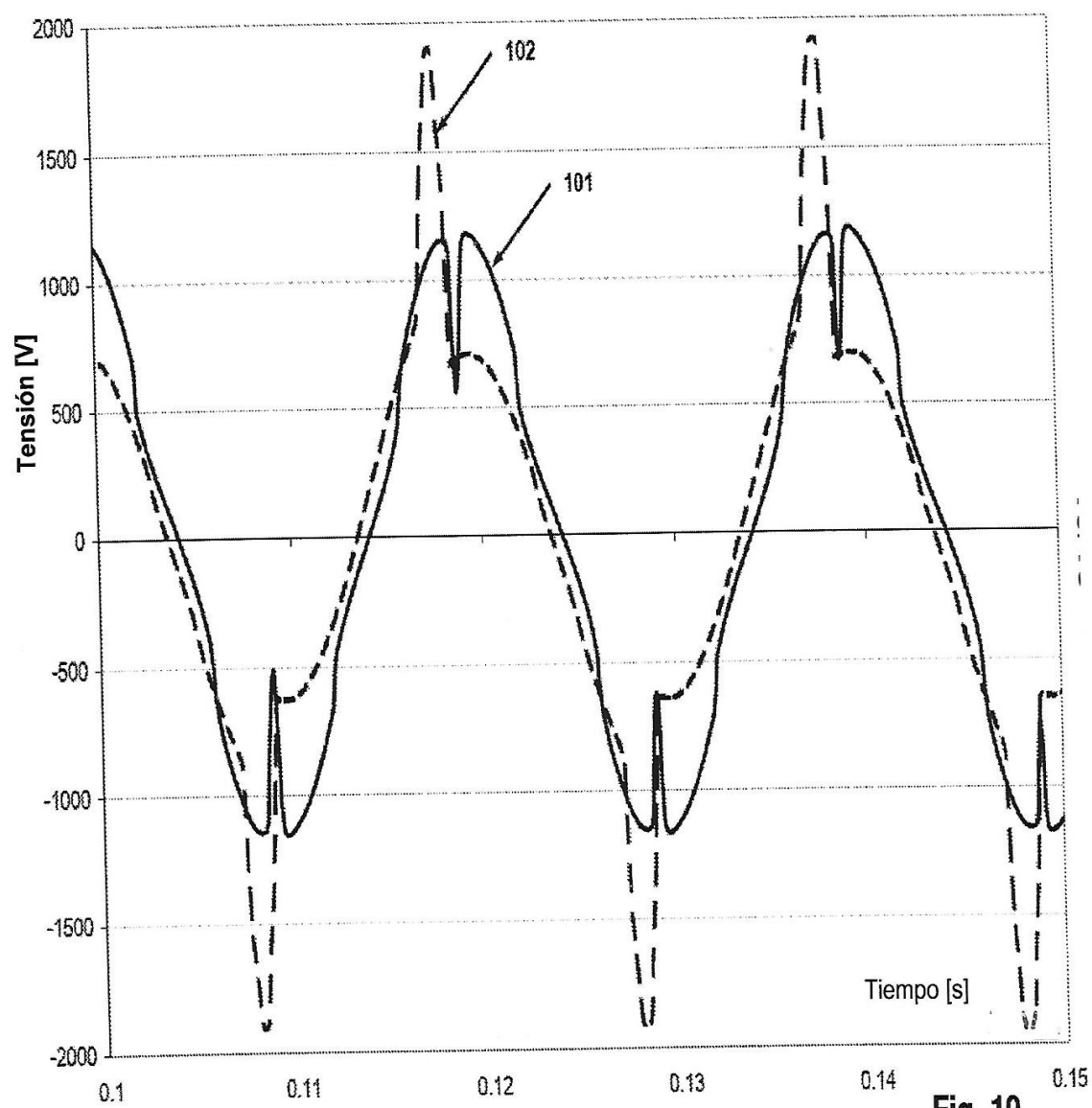


Fig. 10

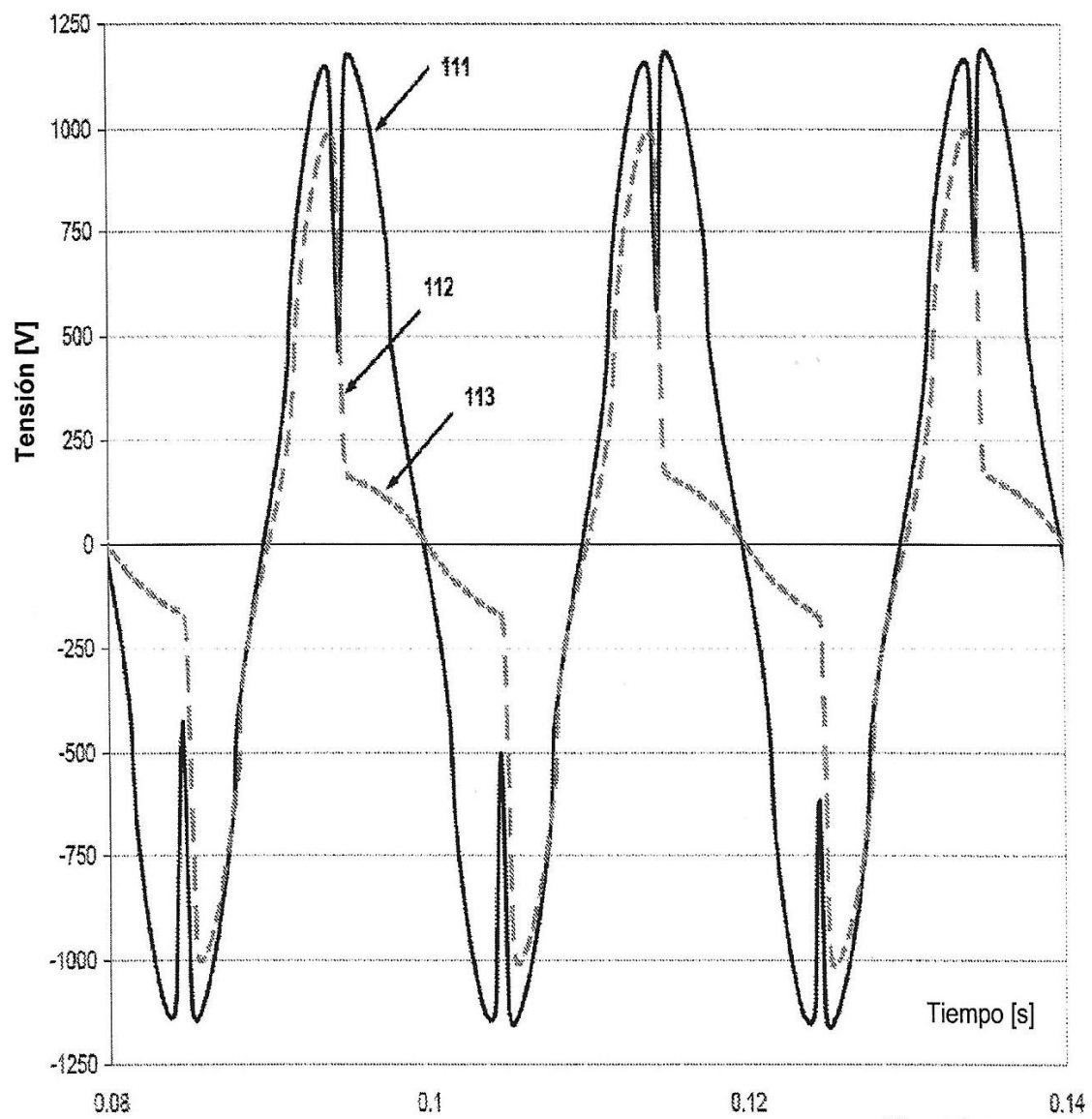


Fig. 11

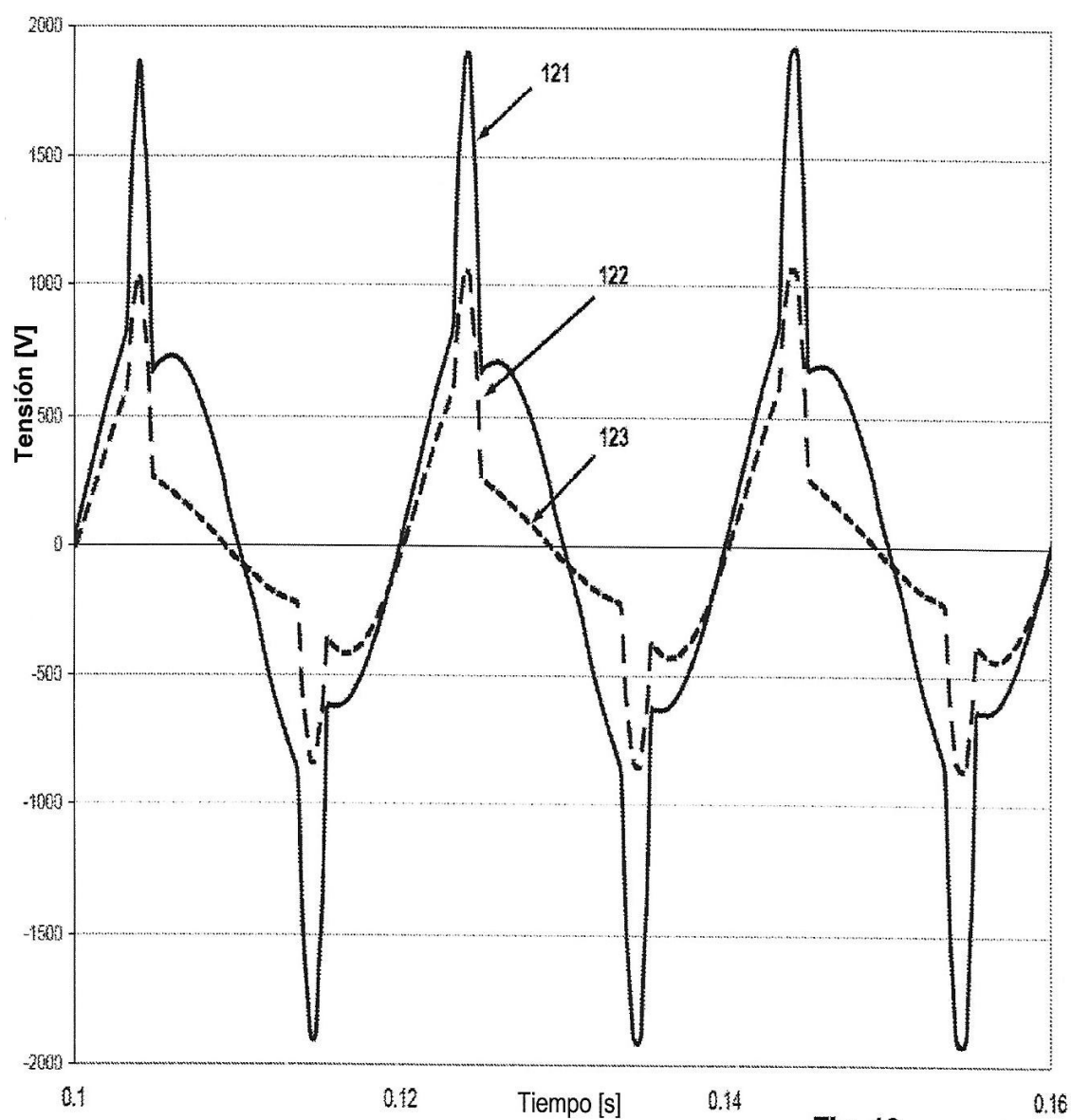


Fig. 12

